

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360035

研究課題名（和文） 新しいポテンシャル制御量子井戸の巨大電界屈折率効果による光制御

研究課題名（英文） Optical phase control using a giant electro-refractive effect in novel potential-tailored quantum wells

研究代表者

荒川 太郎 (ARAKAWA TARO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40293170

研究成果の概要：

半導体超薄膜構造である量子井戸において、長距離光通信波長帯である 1.55 ミクロン波長帯において、大きな電界屈折率変化が得られる構造を新たに提案し、その特性の理論的および実験的な研究を行った。その結果、理論予測に近い特性が得られることがわかり、その有用性を実証した。また、マッハ・ツェンダー干渉計型光変調器を作製し、低駆動電圧化を実現した。この成果は、次世代大容量光通信ネットワークの構築に大いに資するものと期待される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2007 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎／応用工学・量子光工学

キーワード：光変調器、光スイッチ、量子井戸、半導体、電界誘起屈折率変化

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクス発展に伴い、光変調、光の空間的スイッチなどいわゆる光制御デバイスの機能への要求は急速に高度化している。光制御デバイスのうち、半導体を用いた光変調デバイスでは、量子井戸の電界誘起光吸収 (EA) 効果が多用されているが、動作速度や許容入力光強度、動作電圧等の限界に近づきつつある。

量子井戸における EA 効果ではなく、電界誘起屈折率効果を利用できれば、非常に有益である。しかしながら、従来、通常用いられ

てきた矩形量子井戸では、電界誘起屈折率変化 Δn は光吸収端波長付近では大きいものの、十分に長波長側に離れた透明波長域では激減してしまうため、量子井戸の ER 効果は実際上ほとんど利用されていない。

上記の課題をする克服する技術としてこれまで研究を行ってきたのが、矩形以外の人工的なポテンシャル分布を持つポテンシャル制御量子井戸である。特に、申請者らは、このポテンシャル制御量子井戸のうち、巨大な ER 効果が期待される 5 層非対称結合量子井戸 (FACQW) について研究を行い、低電

界領域において理論予測どおりの巨大な電界誘起屈折率効果が得られことを実証し、光変調デバイスの試作を行ってきた。この研究の過程において、FACQWよりも更に優れた電界屈折率変化特性が得られる可能性のある新しいポテンシャル構造を発見した。

2. 研究の目的

本研究は、上記の新しい動作原理に基づくポテンシャル制御量子井戸を提案し、理論的に予測された極めて優れた電界誘起屈折率変化特性を実証するとともに、干渉型光変調デバイスを試作し、その有用性を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、提案するポテンシャル量子井戸構造である三重結合量子井戸、五層非対称結合量子井戸のバンド構造について、 $k \cdot p$ 摂動法を用いた詳細な解析を行い、上記の量子井戸構造の動作原理およびその電界誘起屈折率変化特性を明らかにするとともに、各波長、各材料における構造の最適化を行う。次に、分子線エピタキシー法を用いて本構造を作製し、その動作の実証を行う。さらに、マッハ・ツェンダー干渉型光変調素子を試作して、その特性を評価する。

4. 研究成果

以下の研究成果が得られた。

(1) GaAs/AlGaAs 非対称三重結合量子井戸構造に関する成果

①電界誘起屈折率効果の詳細な特性解析を行った。計算方法としては、 $k \cdot p$ 摂動法により全て準位の価電子帯構造を計算した。次に、非変分法的手法により励起子の束縛エネルギー等の計算を行い、価電子帯の非放物線性を考慮しつつ、非対称三重結合量子井戸の電界誘起屈折率変化特性計算を構造の最適化と詳細な特性解析を行った。その結果、電界強度 30~40kV/cm 付近できわめて大きな電界に対する屈折率変化率 (dn/dF) が得られ、位相変調器やマッハ・ツェンダー型光変調器、光スイッチ用材料として有望であることが分かった。

②分子線エピタキシー法による作製と評価を行った。低温フォトルミネセンス法により量子井戸層の構造評価を行い、ほぼ設計通りの構造ができていること、界面平坦性も良好であることがわかった。次に、室温光吸収電流測定を行い、理論計算で予測された非対称三重結合量子井戸特有の急激な吸収係数変化が生じており、本構造が有望であることがわかった。

③GaAs/AlGaAs 非対称三重結合量子井戸と関連の深い構造として、五層非対称結合量子井戸マッハ・ツェンダー変調器を分子線エ

ピタキシー法により作製し、評価した。その結果、半波長電圧・位相変調部長積は波長 850nm で 5.4 Vmm と優れた特性を実現した。この値は、同時に作製した通常の量子井戸マッハ・ツェンダー変調器の約3倍の位相変調効率で、五層非対称結合量子井戸の有用性が実証された。波長依存性も測定し、830~870nm の波長で屈折率変化量は、長波長側へいくほど小さくなるものの、理論予測と同様、大きな屈折率変化が生じることを明らかにした。

(2) 長波長系 InGaAs/InAlAs 非対称三重結合量子井戸構造に関する成果

①長波長系InGaAs/InAlAs 非対称三重結合量子井戸構造の設計：長距離光通信波長帯である1.55ミクロン帯でも本構造を利用すべく、InGaAs/InAlAs 非対称三重結合量子井戸構造の設計を行った。その結果、 $dn/dF=1.33 \times 10^{-3} \text{ cm/kV}$ と、InGaAs/InAlAs五層非対称結合量子井戸現構造の約2倍の屈折率変化が期待できることが明らかになった。すなわち、GaAs/AlGaAs材料系のみならず、長波長帯用InGaAs/InAlAs 非対称三重結合量子井戸構造も極めて有望であることを明らかにした。

②長波長系InGaAs/InAlAs 五層非対称結合量子井戸構造の作製：GaAs非対称三重結合量子井戸と関係の深い構造としてInGaAs/InAlAs五層非対称結合量子井戸構造を分子線エピタキシー法により作製を行った。低温フォトルミネセンス法による評価を行い半値幅10meVと良好な構造が作製されていることを示した。室温光吸収電流測定もを行い、理論計算で予測された五層非対称結合量子井戸構造に特有な軽い正孔に関する吸収係数変化が生じていることを実験的に示した。このことから、InGaAs/InAlAs材料系でも、良好な非対称三重結合量子井戸構造が作製可能であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

(1) M Fukuoka, T. Toya, Y. Sawai, T. Arakawa, and K. Tada, "Electrorefractive Effect in GaInNAs/GaAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well", Jpn. J. Appl. Phys. 48(4), pp. C154-1-3, 2009. (査読あり)

(2) T. Arakawa and K. Tada, "Nano-structured special quantum well for high-performance optical modulators(Invited)", Proceedings of SPIE Vol. 6782, pp. 67820W1-12, 2007. (招待論文のため査読なし)

(3) M. Sugiyama, N. Waki, Y. Nobumori, H. Song, T. Nakano, T. Arakawa, Y. Nakano,

and Y. Shimogaki, "Control of abnormal edge growth in selective area MOVPE of InP", J. Crystal Growth, vol.287, no.2, pp.668-672, 2006. (査読あり)

[学会発表] (計 14 件, ただし国際会議のみ)

- (1) M. Fukuoka, T. Toya, Y. Sawai, T. Arakawa, and K. Tada, "Theoretical Analysis of Electrorefractive Effect in GaInNAs/GaAs Five Layer Asymmetric Coupled Quantum Well (FACQW) for 1.3 micron Phase Modulator", Extended Abstracts of 2008 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM), Tsukuba, pp.1096-1097 (Sep. 26, 2008).
- (2) M. Fukuoka, T. Hariki, S. Tajitsu, T. Toya, T. Arakawa, K. Tada, "InGaAs/InAlAs FACQW Mach-Zehnder Modulator", European Conference on Optical Communication (ECOC) 2008, P.2.22, Brussels (Sep. 24, 2008).
- (3) W. Endo, H. Matsumoto, R. Shirakawa, T. Arakawa, and K. Tada, "Fabrication of Asymmetric Triply Coupled Quantum Well for High-Performance Optical Modulators /Switches", 13th OptoElectronics and Communication Conference (OECC2008), ThP-67, Sydney (Jul. 10, 2008).
- (4) R. Hasegawa, Y. Sawai, T. Amemiya, T. Arakawa, T. Tanemura, H. Simizu, K. Tada, and Y. Nakano, "Phase Modulator with InGaAs/InAlAs FACQW Grown by MOVPE", 13th OptoElectronics and Communication Conference (OECC2008), TuH-5, Sydney, (Jul. 8, 2008).
- (5) K. Tada and T. Arakawa, "Advanced Semiconductor Optical Modulators Based on Quantum Wells", Abstracts of Japan-Brazil Memorial Symposium on Science & Technology 1908-2008, pp.24-26, Sao Paulo (Jun. 24, 2008).
- (6) K. Tada and T. Arakawa, "Nano-structured special quantum well for high-performance optical modulators (Invited)", Asia-Pacific Optical Communications (APOC 2007), 6b-3, Wuhan, China (Nov. 4, 2007).
- (7) K. Tada and T. Arakawa, "Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well with Giant Electrorefractive Effect (Invited)", International Nato-Optoelectronics Workshop (iNOW), Session 1-1, Lanzhou, China, (Aug. 7, 2007).
- (8) M. Fukuoka, T. Toya, T. Arakawa, and K. Tada, "Electrorefractive Effect in InGaAsP Five Layer Asymmetric Coupled Quantum Well (FACQW) for High Performance Optical Modulators", 12th OptoElectronics and Communication Conference (OECC 2007), 12P-28, Yokohama, Japan (Jul. 12, 2007).
- (9) T. Arakawa, Takahiro Toya, K. Yamaguchi, T.Uchimura, J.-H. Noh, and K. Tada, "InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well and Its Application to Compact and Low-Voltage Optical Switch", 9th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM '07), PB13, Matsue (May 16, 2007).
- (10) T. Arakawa, K. Takada, F. Tadano, T. Arima, J.-H. Noh, and K. Tada, "GaAs/AlGaAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well (FACQW) Mach-Zehnder Modulator", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO '07), CMP3, Baltimore, USA (May 7, 2007).
- (11) T. Arakawa, K. Takimoto, S. Miyazaki, K. Yamaguchi, N. Haneji, J.-H. Noh, and K. Tada, "Electroabsorptive Properties of InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well (FACQW)", 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2006), P-8-5, Yokohama (Sep. 14, 2006).
- (12) T. Arakawa, K. Takada, T. Arima, J.-H. Noh, and K. Tada, "MBE Growth of GaAs/AlGaAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well and Its Electrorefractive Properties", The 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2006), TuP-42, Tokyo (Sep. 5, 2006).
- (13) T. Arakawa, H. Miyake, Y. Nakada, and K. Tada, "Theoretical Analyses of InGaAs/InAlAs FACQW Compact and Low-Voltage Switches", The 11th OptoElectronics and Communication Conference (OECC2006), 6C1-1, Kaohsiung, Taiwan (Jul. 6, 2006).
- (14) T. Arakawa, H. Itoh, T. Arima, N. Haneji, J.-H. Noh, and K. Tada, "Characterization of Electrorefractive Effect in GaAs/AlGaAs FACQW Using Heterodyne Detection", The 11th OptoElectronics and Communication Conference (OECC2006), 5P11, Kaohsiung, Taiwan (Jul. 5, 2006).

[図書] (計 2 件)

- (1) 荒川太郎 (分担執筆) ほか 33 名, 「ドライ・ウエットエッチング技術全集」(第 2 章 8 節を担当, 13 ページ相当), 技術情報協会出版, 2009 年 3 月.
- (2) T. Arakawa and K. Tada, "Advances in Materials Research 9, Nano-and Micromaterials" (Chapter 10: Potential- Tailored Quantum Wells

for High- Performance Optical Modulators /Switches, pp.263-274 の分担執筆を担当), Springer, 2008 年 1 月.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

(1)

名称：一方向性損失付加デバイス、一方向性
発振リングレーザ、および光アイソレータ

発明者：國分泰雄, 荒川太郎, 大澤和弘

権利者：横浜国立大学

種類：特許出願

番号：2008-221074

出願年月日：2008 年 8 月 29 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒川 太郎 (ARAKAWA TARO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40293170

(2) 研究分担者

多田 邦雄 (TADA KUNIO)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：00010710

羽路 伸夫 (HANEJI NOBUO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30180920

(3) 連携研究者

なし